مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

OPEN ACCESS JOURNAL

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال سی و دوم، شمارۀ سوم، پاییز ۱۴۰۳، از صفحۀ ۶۰۷ تا ۶۱۴

بررسی اثر ریخت نانوذرات بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت کبالت

سیده عصمت میرسالاری[۱]، مرتضی زرگر شوشتری[۱*]، ناهید پوررضا[۲]

۱ -گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲ -گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۱/۲۹)

چکیده: در این پژوهش، ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی و ریخت‌شناسی نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت با استفاده از پراش سنج پرتوی ایکس، مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی، میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری و روبشی گسیل میدانی، طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی ایکس و جذب – واجذب نیتروژن بررسی و مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که هر دو نمونه بدون فازهای ناخالصی و دارای ساختار اسپینلی مکعبی با گروه فضایی Fd-3m و توزیع اندازه‌ی ذرات یکنواخت هستند. نمونه‌ی نانوذرات فریت کبالت با اندازه‌ی متوسط ۳۰ نانومتر و مساحت سطح ویژه ۵۹٫۸۶ مترمربع برگرم و نمونه‌ی دیگر به‌صورت نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت با اندازه‌ی متوسط ۱۱۳ نانومتر و مساحت سطح ویژه ۷۷٫۵۱ متر مربع بر گرم هستند. اندازه‌ی متوسط بلورک‌های نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت ساخته شده، به‌ترتیب ۱۵ nm و ۱۰ nm به‌دست آمد. بررسی‌های انجام شده نشان دادند که با کاهش اندازه بلورک‌ها، مغناطش اشباعی افزایش و میدان وادارندگی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: *فریت کبالت*؛ $CoFe_2O_4$؛ *نانوکره‌ی متخلخل*؛ *نانوذره*؛ *جذب – واجذب نیتروژن*؛ *BET*.

مقدمه

در مقایسه با مواد مغناطیسی حجیم، مواد مغناطیسی نانومقیاس به‌دلیل داشتن ویژگی‌های جدید و طیف کاربردی گسترده، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته‌اند. نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ویژگی‌های نانومواد به‌طور عمده به اندازه، ریخت، نوع ترکیب و ویژگی‌های سطحی ذرات بستگی دارند [۱]. توانایی کنترل ویژگی‌های مغناطیسی چون میدان وادارندگی (H_c)، مغناطش اشباع (M_s) و مغناطش مانده (M_r) با تنظیم اندازه، شکل و ترکیب، نه‌تنها برای درک اساسی پدیده مغناطیس بلکه همچنین برای کاربردهای مختلف نانومواد مغناطیسی چون ضبط نوار مغناطیسی [۲]، دستگاه‌های مغناطیس نوری [۳]، تصویربرداری تشدید مغناطیسی[۴]، جذب ریزموج‌ها [۵]، حسگرها [۶] و کاربردهای پزشکی [۷] مهم است. گروه مهمی از نانومواد مغناطیسی، نانو بلورهای فریت اسپینلی با فرمول عمومی MFe_2O_4 هستند که در آن M یون‌های فلزی دوظرفیتی چون Co^{2+} ، Mn^{2+}، Zn^{2+} ، Fe^{2+}، Ni^{2+}، Cu^{2+}، Mg^{2+} است. ساختار اسپینلی آرایش مکعبی تنگ‌پکیده‌ای از یون‌های اکسیژن بوده که کوچکترین یاخته تکرار شونده آن از ۳۲ یون اکسیژن تشکیل شده است. یون‌های M^{2+} و Fe^{3+} جایگاه‌های شبکه بلوری متفاوتی را اشغال می‌کنند. برخی از این جایگاه‌ها با ۴ همسایۀ نزدیک از یون‌های اکسیژن یک چاروجهی (جایگاه A) را تشکیل می‌دهند. برخی دیگر از این جایگاه‌ها با ۶ همسایه نزدیک از یون‌های اکسیژن تشکیل یک هشت وجهی (جایگاه B) می‌دهند. در واقع ساختار اسپینلی دارای دو جایگاه کاتیونی برای اشغال با کاتیون‌های فلزی است. در این ساختار، هشت جایگاه A و شانزده جایگاه B وجود دارند [۸]. مواد MFe_2O_4 اغلب با محیط زیست سازگار هستند و به‌دلیل کاربردهای ممکن در

*نویسنده مسئول: ۰۹۱۶۳۱۰۸۷۷۰، پست الکترونیکی: zargar@scu.ac.ir

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]

زمینه‌های مختلف ازجمله آهنرباهای دائمی، رسانه‌های ضبط با چگالی بالا، دارورسانی هدفمند و حسگرهای زیستی در سال-های اخیر به‌طور گسترده بررسی شده‌اند [۹، ۱۰] . ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی نانوساختارهای فریت اسپینلی به عوامل مختلفی چون ترکیب شیمیایی، شکل و اندازه، روش ساخت، دمای بازپخت، چگونگی توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های چاروجهی و هشت‌وجهی بسیار حساس هستند [۱۱]. در میان فریت‌های اسپینلی، فریت کبالت ($CoFe_2O_4$) به‌دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی قابل توجه چون مغناطش اشباع متوسط، میدان وادارندگی بالا، ناهمسانگردی مغناطیسی بلوری و همچنین پایداری شیمیایی و سختی مکانیکی بالا، بسیار جالب توجه بوده و پژوهش‌های بسیاری در زمینه روش‌های ساخت و بررسی ویژگی‌ها و کاربردهای آن صورت گرفته است [۱۱-۱۴]. با این‌حال، تاکنون بررسی‌های کمی پیرامون بررسی مقایسه‌ای اثر ریخت بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی فریت کبالت انجام شده است. در سال ۲۰۱۵ لو[1]و همکاران، نانو ذرات فریت کبالت را به روش تجزیه گرمایی[2]و در سه ریخت متفاوت کروی، مکعبی و شبه ستاره ساخته و سپس ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن‌ها را بررسی و مقایسه کردند [۱۵]. یونگدرا کومار[3]و همکاران در سال ۲۰۱۷ نانوذرات فریت کبالت را با سه شکل کروی، مکعبی و شش‌گوشی به روش بر پایه محلول و با تنظیم زمان واکنش و مقدار حلال ساخته و پس از بررسی و مقایسه ویژگی‌های ساختاری آن‌ها، کاربردشان به عنوان حسگر رطوبت را بررسی کردند [۶]. در سال ۲۰۲۰، دیمپال تومار[4]و همکاران، نانوذرات فریت کبالت را به روش تجزیه گرمایی و با استفاده از اتیلن گلیکول ساختند. آن‌ها با تغییر دمای ساخت و همچنین تغییر مقدار اتیلن گلیکول مورد استفاده، نانوذرات فریت کبالت را با سه ریخت متفاوت نانومیله، شش ضلعی و هشت وجهی ساخته و سپس ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها را بررسی و مقایسه کردند [۱۲]. با وجود پژوهش‌های انجام شده، تاکنون بررسی مقایسه‌ای در مورد ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت انجام نشده است. در این پژوهش، نانو ذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌ترتیب به روش گرمابی و حلال گرمایی ساخته شدند. این روش‌ها، آسان، مقرون به صرفه با رویکرد مطمئنی برای تولید ریخت‌های کنترل‌شده با توزیع همگن نانوذرات هستند. با این پژوهش مشخص شده است که شکل و ریخت ذرات می‌تواند بر ویژگی-های مغناطیسی و ساختاری نانوذرات $CoFe_2O_4$ اثر بگذارد.

1- Lu
2- thermal decomposition
3- Yogendra Kumar
4- Dimpal Tomar

روش آزمایش

در این پژوهش، نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌ترتیب به روش گرمابی و حلال گرمایی ساخته شدند که در ادامه روش ساخت آن‌ها توضیح داده شده است. برای ساخت این ذرات از نیترات آهن، $Fe(NO_3)_3.9H_2O$، نیترات کبالت، $Co(NO_3)_2.6H_2O$، سدیم هیدوکسید، NaOH، کلرید آهن، $FeCl_3.6H_2O$، کلرید کبالت $CoCl_2.6H_2O$، اتیلن گلیکول، $HOCH_2CH_2OH$، پلی اتیلن گلیکول، $H(C_2H_4O)_nOH$، سدیم استات تری هیدرات، $CH_3COONa.3H_2O$ مواد اولیه با درجه خلوص بالا استفاده شد.

تهیه نانو ذرات فریت کبالت

برای ساخت نانو ذرات فریت کبالت(CFO) ، *نخست* ۳/۶ میلی مول نیترات آهن به ۷۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده اضافه و روی همزن مغناطیسی همزده شد. پس از ۵ دقیقه، ۱/۸ میلی مول نیترات کبالت به محلول اضافه گردید و به مدت ۲۰ دقیقه دیگر همزده شد. سپس محلول ۶ مولار هیدروکسید سدیم به آرامی به محلول بالا اضافه شد تا pH محلول برابر با ۱۲ شود. محلول به دست آمده به تفلون ۱۰۰ میلی لیتر منتقل گردید و سپس در اتوکلاو قرار گرفت و به مدت ۱۲ ساعت در دمای $^{\circ}C$ ۱۶۰ گرمادهی شد.

تهیه نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت

برای ساخت نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت، ۲/۵ میلی مول کلرید کبالت و ۵ میلی مول کلرید آهن در ظرف دربردارنده ۴۰/۰ میلی‌لیتر اتیلن اتیلن گلیکول ریخته و روی همزن مغناطیسی - هم زده شدند. طی هم زدن محلول، ۳/۶ گرم تری هیدرات استات سدیم و ۲ گرم پلی اتیلن گلیکول اضافه شد. مخلوط به دست آمده در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای ۳۰ دقیقه هم زده شد تا یک محلول همگن تشکیل شود. سپس محلول به‌ظرف تفلون اتوکلاو با ظرفیت ۱۰۰ میلی‌لیتر منتقل شد و در دمای ۱۸۰ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت گرمادهی شد.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]

در هر دو مورد تهیه نانو ذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت، پس از پایان فرآیند به اتوکلاو فرصت داده شد به آرامی به دمای اتاق برسد. سپس رسوب سیاه رنگ بدست آمده، پس از چند بار شستشو با آب یون‌زدایی شده و اتانول، در دمای ۸۰ °C خشک گردید.

روش های مشخصه یابی

ساختار بلوری، ریخت‌شناسی، مساحت سطح ویژه و ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده، به روش‌های پراش‌سنج پرتوی ایکس(XRD)، تصویربرداری با میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری (TEM) و روبشی گسیل میدانی (FESEM)، طیف-سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDX)، جذب - واجذب نیتروژن و مغناطیس سنجی نمونه ارتعاشی (VSM) بررسی شدند.

نتایج و بحث

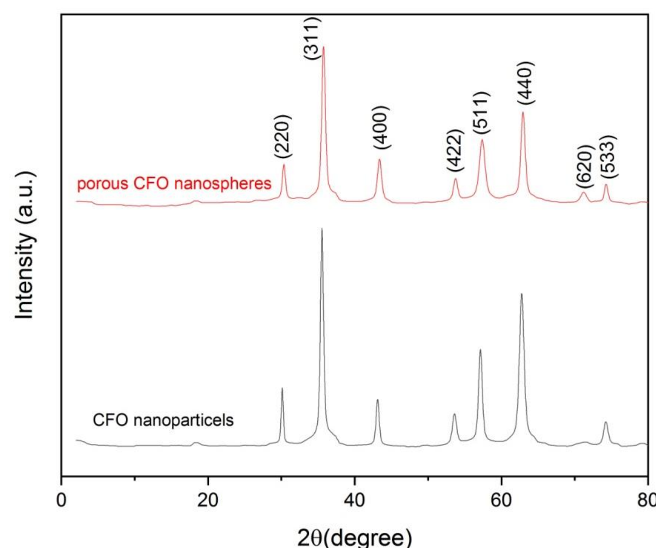
ویژگی‌های ساختاری و ریخت نمونه‌ها

ساختار بلوری و خلوص فاز نمونه‌ها با استفاده از تحلیل طیف-های پراش پرتوی ایکس بررسی شد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. برای هر دو نمونه، قله‌های اصلی در پراش از صفحه-های (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، (۶۲۰) و (۵۳۳) ایجاد شده‌اند. الگوی پراش هر دو نمونه به‌خوبی با کارت استاندارد فریت کبالت (JCPDS NO.00-022-1086) دارای ساختار اسپینلی مکعبی با گروه فضایی Fd-3m همخوانی دارد. در الگوهای پراش به‌دست آمده، شدیدترین قله مربوط به پراش از صفحه‌ی (۳۱۱) است، قله‌های مربوط به ناخالصی دیده نشد و تشکیل و خلوص فاز فریت کبالت تأیید گردید. براساس الگوهای پراش نمونه‌ها، میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با استفاده از رابطه‌ی شرر محاسبه شد.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta Cos\theta} \qquad (1)$$

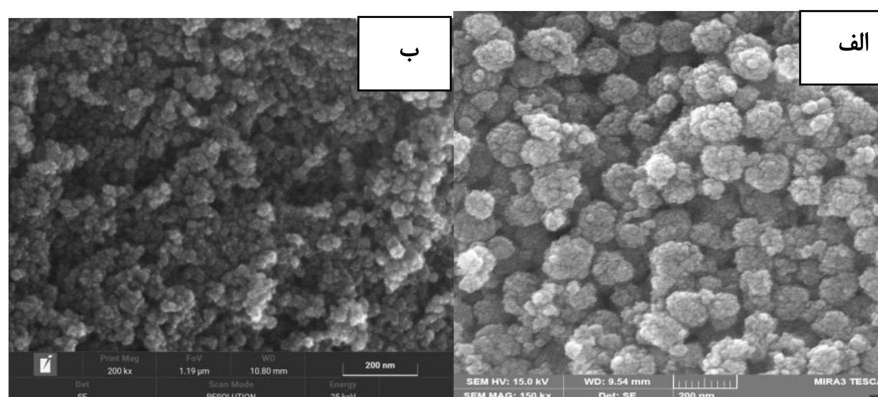
در این رابطه، D اندازه‌ی متوسط بلورک‌ها، λ طول موج پرتوی X ، K ثابت رابطه شرر، β پهنای قله در نصف ارتفاع بیشینه بر حسب رادیان و θ زاویه پراش است. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها برای نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌ترتیب ۱۵ و ۱۰ نانومتر به‌دست آمد.

به‌منظور بررسی شکل و ریخت نمونه‌های ساخته شده، از میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری و روبشی گسیل میدانی استفاده شد (شکل‌های ۲ و ۳). چنان که در شکل ۲ دیده می-شود، در هر دو نمونه اندازه‌ی ذرات تقریباً دارای توزیع یکنواخت است. در شکل ۲ الف، شکل کروی ذرات و وجود تخلخل در آنها نمایان است؛ همچنین می‌توان توزیع ریزکره‌ها روی سطح نانوکره‌های متخلخل را نیز دید. در شکل ۲ ب، ذرات تقریباً شکل کروی دارند و اندازه‌ی آن‌ها کوچکتر از نانوکره‌های متخلخل شکل ۲ الف است. در شکل ۴، نمودارهای توزیع اندازه ذرات نمونه‌های ساخته شده آورده شده است. میانگین اندازه‌ی ذرات با نرم‌افزار دیجی‌مایزر بر تصاویر FESEM شکل ۲ اندازه‌گیری شد. میانگین اندازه نانوکره‌های متخلخل و نانوذرات فریت کبالت به‌ترتیب ۱۱۳ و ۳۰ نانومتر است.

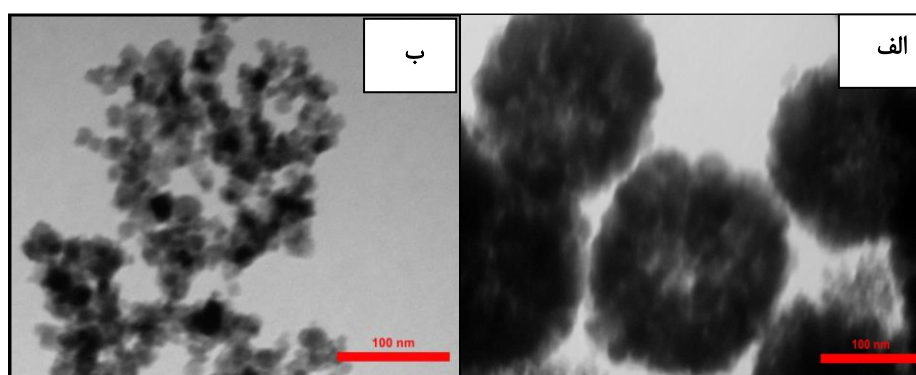


شکل۱ مقایسه الگوهای پراش پرتوی ایکس نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت.

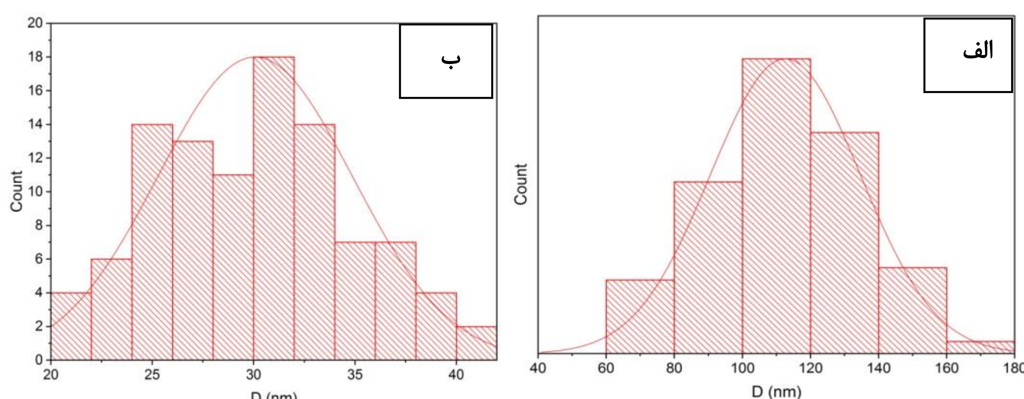
[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]



شکل ۲ تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از (الف) نانوکره‌های متخلخل و (ب) نانوذرات فریت کبالت.



شکل۳ تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری از (الف) نانوکره‌های متخلخل و (ب) نانوذرات فریت کبالت.

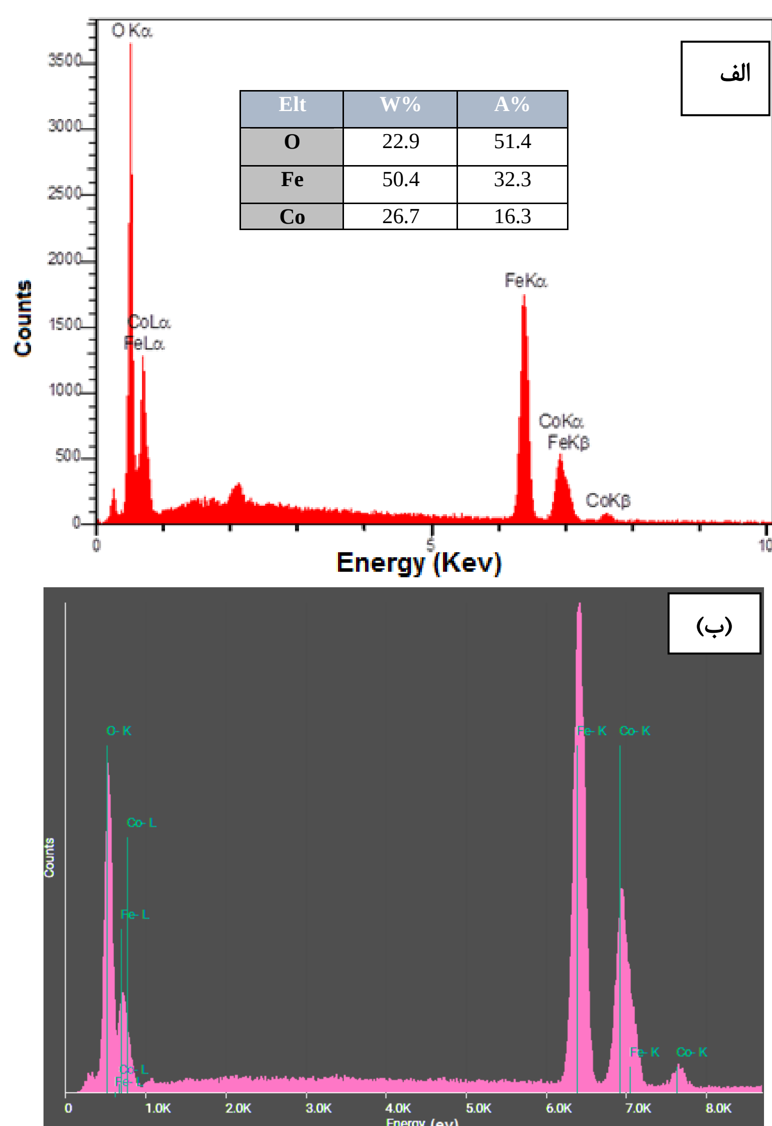


شکل ۴ نمودار توزیع اندازه ذرات (الف) نانوکره‌های متخلخل و (ب) نانوذرات فریت کبالت.

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در شکل ۳ الف تشکیل نانوکره‌های متخلخل تأیید شده و همچنین با مقایسه میزان عبور نور از بخش‌های مختلف هر نانوکره، ماهیت متخلخل نانوکره‌ها را می‌توان به راحتی تشخیص داد. در شکل ۳ ب نیز دیده می‌شود که نانوذرات دارای شکل تقریباً کروی و توپر هستند. همچنین در هر دو تصویر، ذرات به صورت خوشه‌ای در کنار هم انباشت دارند که این امر بدلیل ویژگی مغناطیسی فریت کبالت است.

از آنجا که وجود ناخالصی در نانوساختارها بر ویژگی‌های آن‌ها اثر می‌گذارد، برای اطلاع دقیق‌تر از عناصر موجود در نمونه‌ها، طیف‌سنجی EDX انجام شد. چنان که در شکل ۵ دیده می‌شود، در هر دو طیف فقط عناصر Co,Fe,O حضور دارند و می‌توان گفت که هر دو نمونه بدون ناخالصی در حد آشکارسازی دستگاه هستند.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]



شکل ۵ طیف‌های EDX و نتایج آنها برای (الف) نانوکره‌های متخلخل و (ب) نانوذرات فریت کبالت.

ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها

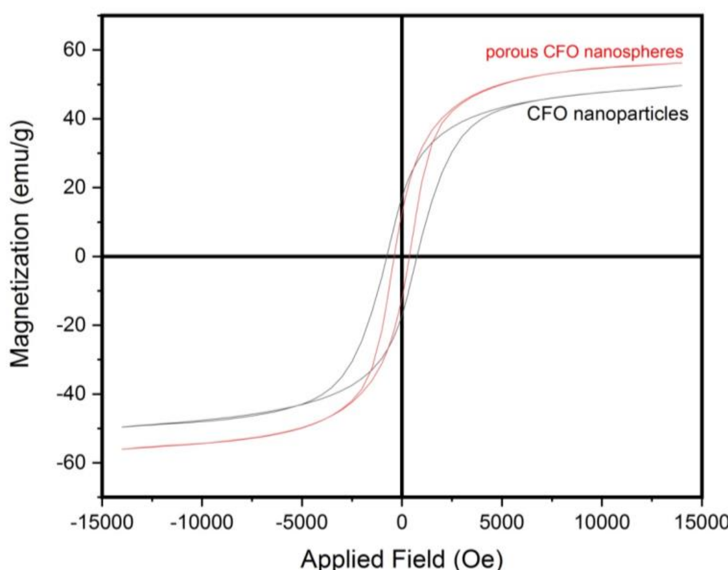
رفتار مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی در دمای اتاق بررسی شد. نمودارها و نتایج این بررسی در شکل ۶ و جدول ۲ آورده شده است. تفاوت مغناطش اشباع نمونه‌های فریت کبالت ساخته شده ناشی از اختلاف مغناطش جایگاه‌های چاروجهی و هشت وجهی است. به‌نظر می‌رسد که نوع مواد اولیه در مرحله ساخت و روش ساخت بر اندازه و چگونگی توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های چار و هشت‌وجهی اثر دارد. تغییر توزیع کاتیون‌ها در این‌جایگاه‌ها باعث تغییر مغناطش اشباع و میدان وادارندگی نمونه‌ها می‌شود [۱۶]. البته مغناطش اشباع و میدان وادارندگی به اندازه‌ی بلورک‌های ذرات نیز بستگی دارد. چیناسامی و همکاران اثر اندازه‌ی بلورک‌ها بر مغناطش اشباع نانوذرات فریت روی را بررسی کرده و دریافتند که وقتی اندازه‌ی بلورک‌های فریت روی کمتر از ۲۰nm است، با کاهش اندازه بلورک‌ها مغناطش اشباع افزایش می‌یابد [۱۷]. همچنین آن‌ها در بررسی دیگری دریافتند که اندازه تک حوزه مغناطیسی فریت کبالت حدود ۴۰ nm است و وقتی اندازه بلورک‌های فریت کبالت کمتر از اندازه تک حوزه باشد، با کاهش اندازه بلورک‌ها میدان وادارندگی فریت کبالت نیز کاهش می‌یابد [۱۸]. در این پژوهش، برای نانوذرات و نانوکره-های متخلخل فریت‌کبالت به‌ترتیب اندازه‌ی بلورک‌ها ۱۵ و ۱۰ nm، مغناطش اشباع ۴۹/۷ و ۵۶/۳ $^{emu}/_{g}$ و میدان وادارندگی ۸۰۰ و ۳۵۰ Oe بدست آمد. چنان که دیده می‌شود، برای هر دو نمونه اندازه بلورک‌ها کمتر از اندازه تک حوزه

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]

مغناطیسی فریت کبالت (۴۰ nm) بوده و با کاهش اندازه بلورک‌ها از ۱۵ به ۱۰nm، مغناطش اشباع از ۴۹٫۷ به ۵۶٫۳ $^{emu}/_{g}$ افزایش و میدان وادارندگی از ۸۰۰ به ۳۵۰ Oe کاهش یافته است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که وقتی اندازه‌ی بلورک‌های فریت کبالت کمتر از اندازه تک حوزه مغناطیسی خود باشد، با کاهش اندازه بلورک‌ها، مغناطش اشباع افزایش و میدان وادارندگی کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده با بررسی نتایج پژوهشگران دیگر در مورد اثر اندازه‌ی بلورک‌های فریت‌های اسپینلی بر مغناطش اشباع و میدان وادارندگی همخوانی دارد [۱۷، ۱۸]. علت این امر می‌تواند تفاوت در مواد اولیه، روش ساخت و چگونگی توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های چا وجهی و هشت وجهی باشد.

جذب- واجذب گاز نیتروژن توسط نمونه‌ها

برای بررسی مساحت سطح ویژه و میزان تخلخل نمونه‌های ساخته شده، همدماهای جذب- واجذب گاز نیتروژن اندازه گیری شد (شکل۷). با تحلیل برانور-امت-تلر (BET) برای نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌ترتیب مساحت سطح ویژه ۵۹٫۸۶ و ۷۷٫۵۱ مترمربع برگرم، حجم متوسط حفره‌ها ۱۳٫۷۵ و ۱۷٫۸۱ سانتی‌متر مکعب برگرم و متوسط قطر حفره‌ها ۱۵٫۹۲ و ۱۷٫۷۵ نانومتر به‌دست آمد. چنان که از بررسی‌های پیشین انتظار می‌رفت، نانوکره‌های متخلخل به دلیل داشتن حفره‌ها و منافذ بزرگتر، دارای سطح ویژه بیشتری نسبت به نانوذرات فریت کبالت هستند و این آزمایش تأیید دیگری بر وجود تخلخل در نمونه نانوکره‌های فریت کبالت است. در ساخت نانو ذرات فریت کبالت به‌روش گرمابی و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌روش حلال گرمایی، میزان گرمادهی و مدت زمان واکنش اختلاف کمی با هم دارند. تفاوت اصلی این دو روش ساخت، نوع حلال و مواد اولیه‌ی آن‌هاست. از این رو، می‌توان گفت که علت تفاوت در مساحت سطح وِیژه‌ی این دو نمونه، به‌طور عمده، تفاوت در نوع حلال و مواد اولیه آن‌هاست

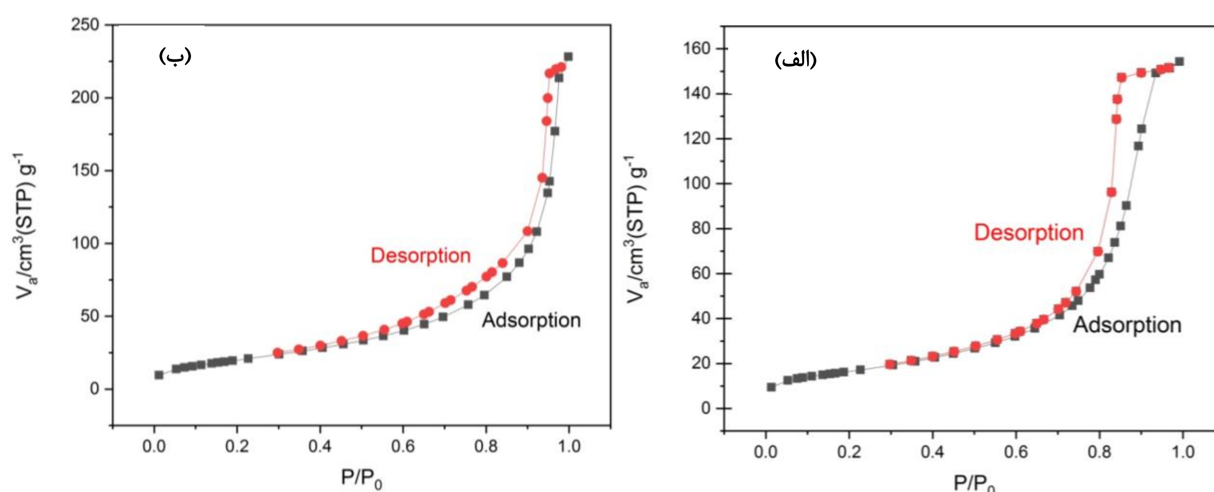


شکل ۶ نمودار VSM نانوکره‌های متخلخل و نانو ذرات فریت کبالت.

جدول ۲ نتایج حاصل از آنالیز VSM انجام شده بر روی نمونه‌های فریت کبالت.

نمونه ساخته شده	اندازه بلورک‌ها (nm)	مغناطش اشباع ($\frac{emu}{g}$)	میدان وادارندگی(Oe)
نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت	۱۰	۵۶٫۳	۳۵۰
نانوذرات فریت کبالت	۱۵	۴۹٫۷	۸۰۰

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]



شکل۷ نمودارهای آنالیز BET (الف) نانوکره‌های متخلخل (ب) نانوذرات فریت کبالت.

برداشت

در این پژوهش، نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت با موفقیت ساخته شدند. بررسی الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های ساخته شده، تشکیل ساختار مکعبی اسپینلی فریت کبالت برای هر دو نمونه را تأیید کرد. با استفاده از رابطه‌ی شرر میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها برای نانو ذرات فریت کبالت ۱۵ nm و برای نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت ۱۰ nm بدست آمد. تصویرهای به‌دست آمده از میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری و روبشی گسیل میدانی نشان دادند که در هر دو نمونه، اندازه‌ی ذرات دارای توزیع یکنواخت است و همچنین نانو ذرات متخلخل، با شکل کروی و تخلخل هستند. نتایج طیف‌های EDX تأیید کردند که هر دو نمونه بدون ناخالصی هستند. نمودارهای به‌دست آمده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی نشان داد که هر دو نمونه دارای ویژگی مغناطیسی هستند. نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به‌ترتیب دارای مغناطش اشباع ۴۹٫۷ و ۵۶٫۳ emu/g و میدان وادارندگی ۸۰۰ و ۳۵۰ Oe هستند. نتیجه گرفته شد که در فریت کبالت، با کاهش اندازه‌ی بلورک‌ها، مغناطش اشباع افزایش و میدان وادارندگی کاهش می‌یابد. مساحت سطح ویژه‌ی نانوذرات و نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت که با آزمون جذب – واجذب نیتروژن بررسی شد، به‌ترتیب ۵۹٫۸۶ و ۷۷٫۵۱ مترمربع برگرم است. هر دو نمونه‌ی ساخته شده به‌دلیل داشتن ویژگی مغناطیسی می‌توانند در زمینه‌های بسیاری چون دارورسانی، ذخیره‌اطلاعات و حذف فلزهای سنگین از آب‌های آلوده کاربرد داشته باشند با این حال، انتظار می‌رود که نانوکره‌های متخلخل فریت کبالت به دلیل داشتن سطح ویژه بیشتر نسبت به نانوذرات فریت کبالت، کاربرد بیشتری داشته باشد.

قدردانی

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز برای حمایت از این پژوهش با پژوهانه به شماره SCU.SP1400.559 قدردانی می‌کنند.

مراجع

[1] Noh S.J., Na W., Jang J.T., Lee J.H., Lee E.J., Moon S.H., Lim Y., Shin J.S., Cheon J., *"Nanoscale magnetism control via surface and exchange anisotropy for optimized ferrimagnetic hysteresis"*, Nano Letters 12(7) (2012) 3716-3721.

[2] Tokoro H., Namai A., Ohkoshi S.i., *"Advances in magnetic films of epsilon-iron oxide toward next-generation high-density recording media"*, Dalton Transactions 50(2) (2021) 452-459.

[3] Rao C.N., Dua P., Kuchhal P., Lu Y., Kale S., Cao P., *"Enhanced sensitivity of magneto-optical sensor using defect induced perovskite metal oxide nanomaterial"*, Journal of Alloys and Compounds 797 (2019) 896-901.

[4] Estelrich J., Sánchez-Martín M.J., Busquets M.A., *"Nanoparticles in magnetic resonance imaging: from simple to dual contrast agents"*, International journal of nanomedicine 10 (2015) 1727.

[5] Dalal M., Das A., Das D., Ningthoujam R.S., Chakrabarti P.K., *"Studies of magnetic, Mössbauer spectroscopy, microwave absorption and hyperthermia behavior of Ni-Zn-Co-ferrite nanoparticles encapsulated in multi-walled carbon*

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]

and studies on their magnetic properties", Journal of Alloys and Compounds 843 (2020) 155815.

[13] Bououdina M., Manoharan C., *"Dependence of structure/morphology on electrical/magnetic properties of hydrothermally synthesized cobalt ferrite nanoparticles"*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 493 (2020) 165703.

[14] Ahmad S.I., *"Nano cobalt ferrites: Doping, Structural, Low-temperature, and room temperature magnetic and dielectric properties–A comprehensive review"*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2022) 169840.

[15] Lu L.T.، Dung N.T., Tung L.D., Thanh C.T., Quy O.K., Chuc N.V., Maenosono S., Thanh N.T., *"Synthesis of magnetic cobalt ferrite nanoparticles with controlled morphology, monodispersity and composition: the influence of solvent, surfactant, reductant and synthetic conditions"*, Nanoscale **7**(46) (2015) 19596-19610.

[16] Vinosha P.A., Manikandan A., Preetha A.C., Dinesh A., Slimani Y., Almessiere M.A., Baykal A., Xavier B., Nirmala G.F., *"Review on recent advances of synthesis, magnetic properties, and water treatment applications of cobalt ferrite nanoparticles and nanocomposites"*, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 34 (2021) 995-1018.

[17] Chinnasamy C., Narayanasamy A., Ponpandian N., Chattopadhyay K., Guerault H., Greneche J., *"Magnetic properties of nanostructured ferrimagnetic zinc ferrite"*, Journal of Physics: Condensed Matter 12(35) (2000) 7795.

[18] Chinnasamy C., Jeyadevan B., Shinoda K., Tohji K., Djayaprawira D., Takahashi M., Joseyphus R.J., Narayanasamy A., *"Unusually high coercivity and critical single-domain size of nearly monodispersed $CoFe_2O_4$ nanoparticles"*, Applied Physics Letters 83(14) (2003) 2862-2864.

nanotubes", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 460 (2018) 12-27.

[6] Kumar Y., Sharma A., Shirage P.M., *"Shape-controlled $CoFe_2O_4$ nanoparticles as an excellent material for humidity sensing"*, RSC advances 7(88) (2017) 55778-55785.

[7] Peeples B., Goornavar V., Peeples C., Spence D., Parker V., Bell C., Biswal D., Ramesh G., Pradhan A., *"Structural, stability, magnetic, and toxicity studies of nanocrystalline iron oxide and cobalt ferrites for biomedical applications"*, Journal of nanoparticle research 16 (2014) 1-10.

[8] Tatarchuk T., Bououdina M., Judith Vijaya J., John Kennedy L, *"Spinel ferrite nanoparticles: synthesis, crystal structure, properties, and perspective applications"*, in Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications: Selected Proceedings of the 4th International Conference Nanotechnology and Nanomaterials (NANO2016), August 24-27 (2016) Lviv, Ukraine, Springer (2017).

[9] Maji N., Dosanjh H.S., *"Ferrite Nanoparticles as Catalysts in Organic Reactions: A Mini Review"*, Magnetochemistry 9(6) (2023) 156.

[10] Barani M., Rahdr A., Mukhtar M., Razzaq S., Qindeel M., Olam S.A.H., Paiva-Santos A.C., Ajalli N., Sargazi S., Balakrishnan D., *"Recent application of cobalt ferrite nanoparticles as a theranostic agent"*, Materials Today Chemistry 26 (2022) 101131.

[11] Kashid P., Suresh H., Mathad S., Shedam R., Shedam M., *"A review on synthesis, properties and applications on cobalt ferrite"* , Int. J. Adv. Sci. Eng 9 (2022) 2567-2583.

[12] Tomar D., Jeevanandam P., *"Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles with different morphologies via thermal decomposition approach*

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.607]